



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



RUAN FERNANDES DE SOUZA

AUTOMATIZAÇÃO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR UAV

OURO PRETO – MG

2022

RUAN FERNANDES DE SOUZA

AUTOMATIZAÇÃO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR UAV

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Co-orientador: Augusto Ferraz

OURO PRETO – MG

2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ruan Fernandes de Souza

Automatização de Análises Granulométrica por UAV

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em engenharia de Minas

Aprovada em 27 de Janeiro de 2023

Membros da banca

Dr Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Eng Augusto Ferraz Ribeiro - ENAEX
Eng. Jorhs Enrique Casimiro Huayhua - DNA Blast

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/02/2023



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/02/2023, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0471496** e o código CRC **77E573D2**.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família, principalmente em quem acreditou nesse sonho, meus pais Ferdinanda e Edgar e meu irmão Ector. Vocês são meus maiores pilares. À Mayara, pelo companheirismo e paciência nessa jornada e a todos meus colegas de trabalho da Enaex, pelo suporte e aprendizado adquirido.

AGRADECIMENTOS

Ao Augusto Ferraz Ribeiro, pela amizade e oportunidade de estágio na Enaex.

A todos os colegas de trabalho da Enaex, em especial Silvio Corsini, Franciel de Moura, Gustavo Calegari, Carlos Alexandre, Renato Nóbrega, Gilmar Pereira, Olismar do Carmo, Eugênio Batista e Luana Vertelo pela contribuição em meu crescimento profissional.

A UFOP e aos professores e mestres com quem tive a oportunidade de aprender, pelo ensino gratuito e de qualidade.

A meu orientador Prof. Dr. Carlos Arroyo, por toda atenção, conhecimento e energia que proporcionaram a realização deste trabalho.

À minha família, por serem sempre minha maior base.

À memorável República Arca de Noé, lar onde tive aprendizado, fiz irmãos e vivi os melhores anos da minha vida.

*“Se eu tivesse perguntado às pessoas o que elas queriam, elas teriam dito cavalos
mais rápidos”*

Henry Ford

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

UAV - Unmanned aerial vehicle

Orthophoto – fotografia aérea

3D - tridimensional

P80 – Porcentagem de 80% na quantidade de fragmentos

Oversize – grande demais

Backbreak – quebra por trás

Vod – Velocidade de detonação

Blaster – responsável pelo desmonte de rocha com explosivo

Gnss - Global Navigation Satellite System

Máx - Máximo

Min - Mínimo

M - Metro

Km/h – quilometro por hora

m/s – Metros por hora

ghz – giga hertz

dbm - decibéis

Eirp - Effective Isotropic Radiated Power

% - Porcentagem

° - Graus

mm - Milimetro

FHD - Full High Definition

s - Segundos

IA – Inteligência Artificial

AI - artificial intelligence

G/cm³ - gramas por centímetro cubico

Mpa – Mega pascal

IF – Itabirito friável

ISC – Itabirito semi compacto

IC – Itabirito Compacto

Kg/m³ – quilogramas por metro cubico

Kg/t – quilogramas por tonelada

2D – duas dimensões

LIDAR - light detection and ranging

Cut-off - cortar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Drone sobrevoando uma cidade	18
Figura 2 - Detonação a favor do mergulho da foliação.....	22
Figura 3 - Detonação contra o mergulho da foliação.....	22
Figura 4 - Detonação ao longo da direção de foliação	23
Figura 5 - Demonstração da onda de choque de um explosivo	24
Figura 6 - Reação do explosivo	25
Figura 7 - Diagrama de detonação de um explosivo com diâmetro reduzido.....	26
Figura 8 - Fragmentação por onda de choque	27
Figura 9 - Onda refletida em uma face livre	28
Figura 10 - Nomenclatura de itens em uma bancada.....	31
Figura 11 - Demonstração de lançamento de pilha.....	34
Figura 12 - Logo da Agência Nacional de Aviação Civil	36
Figura 13 - Foto retirada por drone da massa desmontada	37
Figura 14 - Polígono feito no Google Earth	41
Figura 15 - Plano de voo planejado feito pelo software Maply	41
Figura 16 - Plano de voo executado pelo drone.....	42
Figura 17 - Condições climáticas durante o voo.....	42
Figura 18 - Relação de imagens capturadas durante o voo	43
Figura 19 - Cartografia da região de Conceição do Mato Dentro	45
Figura 20 - Vista aérea da região da Mina do Sapo	46
Figura 21 - Vista aérea dos municípios ao redor da Mina do Sapo	46
Figura 22 - Colunas estratigráficas da região entre São Sebastião do Bom Sucesso e Itapanhocanga.....	47
Figura 23 - Exemplo de plano de fogo	49
Figura 24 - Orthophoto massa desmontada.....	55
Figura 25 - Área selecionada e segmentada por cores em relação ao seu tamanho.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise granulométrica	50
Gráfico 2 - Porcentagem de passante com o tamanho da partícula em milímetros ..	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações aeronave	38
Quadro 2 - Sistemas de detecção	39
Quadro 3 - Sobre seu estabilizador.....	39
Quadro 4 - Sobre câmera da aeronave.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados geomecânicos das principais litologias detonadas da Mina do Sapo	48
Tabela 2 - Projeto de melhoria de fragmentação em desmonte de rochas	49
Tabela 3 - Parâmetros do plano de fogo	51
Tabela 4 - Parâmetros do explosivo	51
Tabela 5 - Parâmetros da carga	51
Tabela 6 - Parâmetros da rocha	52
Tabela 7 - Informações da pilha desmontada por AI	55
Tabela 8 - Relação entre a porcentagem e tamanho dos fragmentos.....	56
Tabela 9 - Tamanho das partículas com porcentagem	57

RESUMO

Na mineração é essencial para o processamento e planejamento da produção mineral, conhecer de forma rápida e precisa sobre a fragmentação proveniente do desmonte de rocha por explosivos. Neste trabalho, é mostrado método de utilização por máquina que caracteriza a pilha desmontada diretamente de imagens por UAV. Em contraste com as abordagens mais avançadas, que requerem uma interação pesada dos utilizadores, conhecimentos especializados e cuidadosos, esse método funciona de forma totalmente automática. Calcula-se cada fragmento individual na pilha desmontada em múltiplas escalas para gerar uma segmentação globalmente consistente. Além disso, registramos imagens do mundo real para gerar o nosso próprio conjunto de dados para a formação da rede. O método se mostra muito promissor em termos quantitativos e resultados qualitativos em todas as nossas experiências. Ademais, os resultados indicam claramente que o nosso método se generaliza a dados nunca vistos, pois introduz o uso de fotografia aérea gerada por drone para recolher e analisar a fragmentação, tanto para áreas de minério de ferro quanto para agregados, a fim de apoiar o contínuo processo de melhoria. O estudo foi capaz de demonstrar um ganho real de tempo e aumento da segurança do processo, executado de forma prática em uma mina de minério de ferro. Em conjunto com o software de análise de fotos, o resultado fornece as minerações um método rápido, preciso e dinâmico de aferição de desempenhos e otimização do processo de redução de tamanho de acordo com as especificações.

Palavras-chave: Fragmentação; UAV; Otimização; Desmonte de rocha.

ABSTRACT

In mining it is essential for the processing and planning of mineral production to know quickly and accurately about the fragmentation coming from the rock dismantling by explosives. In this paper, a machine-use method is shown that characterizes the dismantled pile directly from UAV imagery. In contrast to more advanced approaches, which require heavy user interaction, specialized and careful knowledge, this method works fully automatically. We calculate each individual fragment in the disassembled stack at multiple scales to generate a globally consistent segmentation. In addition, we record real-world images to generate our own dataset for network formation. The method shows great promise in terms of quantitative and qualitative results in all our experiments. Furthermore, the results clearly indicate that our method generalizes to unseen data as it introduces the use of drone-generated aerial photography to collect and analyze fragmentation for both iron ore and aggregate areas to support the continuous improvement process. The study was able to demonstrate a real time gain and increased process safety, executed in a practical way in an iron ore mine. In conjunction with photo analysis software, the result provides mines and aggregates with a fast, accurate and cost-effective method of benchmarking and optimizing the size reduction process to specification.

Key words: Fragmentation; UAV; Optimization; Blasting Rock.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	<i>17</i>
1.1.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>17</i>
1.2 Justificativa do estudo.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Veículos aéreos não tripulados	18
2.1.1 <i>Controle de desastres</i>	<i>19</i>
2.1.2 <i>Agricultura</i>	<i>19</i>
2.1.3 <i>Controle de desmatamento</i>	<i>19</i>
2.1.4 <i>Mineração.....</i>	<i>20</i>
2.2 Fragmentação, produto do desmonte de rochas	20
2.2.1 <i>Parâmetros de fragmentação</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Características do desmonte de rocha.....</i>	<i>23</i>
2.3 Quebra de rocha por Detonação e Interação da energia explosiva com rocha	26
2.4 Desenho do plano de fogo	29
2.5 Cálculos do plano de fogo e fórmulas empíricas.....	30
2.6 Tempo de retardo	33
2.7 Fragmentação	33
2.8 Regulamentação para o uso de drones.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 <i>Ferramenta de análise de fragmentação por AI</i>	<i>43</i>
4 ESTUDO DE CASO	45
4.1 <i>Local de Estudo.....</i>	<i>45</i>
4.2 <i>Geologia local da Mina.....</i>	<i>46</i>

4.3 Características do maciço rochoso	48
4.4 Plano de fogo mina do sapo.....	48
4.4.1 <i>Geometrias do plano.....</i>	48
4.5 Modelo de previsão granulométrica	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 Análise entre o método preditivo e UAV	53
5.2 Benefícios práticos na utilização do método de análise de fragmentação com UAV	58
6 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A apresentação da metodologia proposta nesse estudo contempla a melhoria contínua na mineração. A melhoria está ligada à maximização de utilização das ferramentas chave, na exploração de minas e pedreiras. Quanto mais alto a compatibilidade entre as variáveis controladas do minério e as necessidades da usina, melhor será a produtividade, custo e a qualidade do produto.

Visando superar a fragmentação excessiva ou baixa fragmentação, a usina compensa através da implementação de soluções no processo de beneficiamento, com o objetivo de produzir o produto ideal. Tudo isso requer estudo do minério antes do seu processamento, por exemplo, geologia, distribuição granulométrica, infraestrutura, quantidade de explosivo e perfuração.

O impacto da distribuição do tamanho do minério ao longo do processo provou ser crítico para uma boa qualidade do componente final, bem como o custo atrelado ao desempenho dos componentes (carregamento, moagem e operações de usina). A dinamicidade das informações, sobre as propriedades da pilha desmontada é essencial para o planejamento da produção e processamento industrial. Tais informações, futuramente, são utilizadas para otimizar o trabalho. E por fim a medição da granulometria, após o desmonte, é de fundamental importância para essa a melhoria contínua.

Hoje em dia podemos ver a fragmentação da detonação a partir da utilização de fotografia aérea com drones. Os dados específicos obtidos do local, é um dos importantes blocos de construção no processo de montagem em uma imagem de 360 graus (orthophoto).

Com o avanço das aeronaves não tripuladas tecnologias de sistema (UAV), as operações estão conhecendo os benefícios dos novos recursos, incluindo a análise do tamanho das partículas aéreas através de fotoanálise, levantamento topográfico e perfil 3D da área. A utilização destas ferramentas, permite fazer ajustes que nos auxiliará em futuros desmontes, ajustando o plano de fogo as devidas condições do momento. Este é um primeiro passo na criação de uma ferramenta abrangente que irá ajudar-nos não só a compreender a atual fragmentação por explosivos, mas também facilitar decisões baseadas em dados de fragmentação e nos auxiliando.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Comparar o método de análise de fragmentação por UAV e imagem convencional, possibilitando gerar as curvas granulométricas, produto do desmonte de rochas com explosivos, que nos mostram o tamanho médio e a distribuição granulométrica do material.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o uso do drone.
- Discutir as principais vantagens com o método por UAV em comparação com a análise convencional.
- Limitações do uso do método convencional.

1.2 Justificativa do estudo

Visando a diminuição do tempo de coleta de dados em campo, o aumento na precisão da análise de distribuição granulométrica após o desmonte e o aumento na segurança dos colaboradores, o presente estudo se idealizou e foi executado durante um longo período.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Veículos aéreos não tripulados

Por mais que os drones tenham tido uma longa história no contexto militar, o seu uso está cada vez mais generalizada em funções não militares (HODGKINSON; JOHNSTON, 2018). Atualmente sua utilização está limitada a uma tecnologia em fase de desenvolvimento, mesmo que haja significantes drones de versatilidade potencial que podem transformar a forma como a logística e os serviços são prestados. A sua utilização conduzirá, sem dúvida, à realização de novos objetivos empresariais, sociais, ambientais e outros (ATWATER, 2015). Contudo, também cria um cenário potencialmente grande, crescendo de forma desordenada e causando problemas para outras partes do sistema económico.

Supreendentemente, durante a crise da COVID-19, o potencial do drone (FIG. 1) aumentou, abrindo novos caminhos da tecnologia para modificar a atual prestação de serviços, a segurança e os níveis de capacidade. Por exemplo, a entrega de máscaras faciais em ilhas remotas na Coreia do Sul e medicamentos prescritos de farmácias a aldeias de reforma na Florida. Podemos dizer que a COVID-19 tem aumentado a utilização da tecnologia em muitas áreas e que talvez os drones representem uma revolução na forma como transportamos mercadorias e potencialmente até a nós próprios.

Figura 1 - Drone sobrevoando uma cidade



Fonte: O autor, 2022

Nota-se que cada dia mais é utilizado drones para atividades comerciais, como atividades de engenharia, mineração e agricultura. A sua capacidade de visualizar grandes áreas de forma rápida e com baixo custo quando comparado a voos com aeronaves convencionais proporciona novos aspectos de visualização e nova capacidade de aquisição de dados (ou os dados existentes podem ser de grande escala a um custo mais baixo) para tomar decisões e gerir operações com maior eficácia. Aqui está algumas das atividades que estão sendo utilizados drones.

2.1.1 Controle de desastres

Infelizmente algumas catástrofes acontecem onde não esperamos e em qualquer lugar do planeta, sejam elas por causas naturais ou efeito dos homens. Como terremoto, tsunamis, rompimento de barragens e desabamentos. O salvamento de vítimas sempre leva muito tempo e nem sempre consegue resgatar com vida. Desta forma, o uso de drones pode ajudar na busca por desaparecidos, mapeamento de área afetada e no envio de forma rápida para as equipes de resgate.

2.1.2 Agricultura

É de conhecimento de todos, que o plantio da maioria dos grãos e a pecuária, se utiliza de grandes áreas. O uso de drones pode facilitar o controle desses grandes campos, permitindo que o dono do negócio tenha acesso de forma rápida e precisa de tudo que está acontecendo com sua plantação ou seu rebanho.

2.1.3 Controle de desmatamento

O uso de drones no controle de desmatamento foi um grande avanço para os ambientalistas. Com ele é possível observar, vários cenários ao longo dos anos, áreas que antes era de difícil acesso, hoje já estão sendo mapeadas e em constante observação. Alguns sensores instalados nos drones, podem nos dizer o nível de umidade, qualidade do solo, queimadas e poluição.

2.1.4 Mineração

Drones podem aumentar a segurança em aplicações relacionadas a mineração. Informação em tempo real, como os últimos levantamentos de superfície para padrões de detonação, informação rápida e precisa do pré e pós desmonte, além a possibilidade de visualizar fogos falhados (misfires). Ademais, os drones podem fornecer uma abordagem eficaz para monitorizar taludes e ajudar na exploração da área, bem como na gestão de barragens.

2.2 Fragmentação, produto do desmonte de rochas

2.2.1 Parâmetros de fragmentação

A fragmentação de rochas influencia uma série de empreendimentos minerários e processos de cominuição, incluindo taxas de carga e transporte, peneiramento e desempenho na recuperação de minério em processos de beneficiamento (MICHAUD *et al.*, 1997). Na mineração a céu aberto, onde a detonação é usada antes da lavra, a relação custo benefício global das operações de produção deve ser compatível com a perfuração e os parâmetros de desmonte. Assim, a fragmentação da rocha depende de dois grupos de variáveis: propriedades do maciço rochoso, que não são parâmetros controlados e de perfuração e desmonte que podem ser controladas e otimizadas.

Os custos das operações no processamento, podem ser reduzidos através da melhora nos parâmetros do desmonte a fim de fornecer uma boa fragmentação da área a ser lavrada. Os parâmetros de fragmentação são variáveis específicas e mudam de mina para mina. O elevado nível de mecanização e a natureza integrada dos sistemas de produção, adaptados na indústria mineira, exigem que todas as unidades funcionem conforme foram dimensionadas e com capacidade para atingir os objetivos de produção planejados (SINGH; NARENDRULA, 2009).

O objetivo de um engenheiro de desmonte numa mina é fazer um plano de fogo que permita gerar uma pilha de minério adequada com distribuição de tamanho adequado da rocha que possa ser eficientemente carregada, transportada e moída (SINGH *et al.*, 2005). O objetivo de um desmonte eficiente pode ser alcançado através da investigação da relação entre os parâmetros de desmonte e a fragmentação. É

extremamente importante fazer a ligação entre os resultados do desmonte de rocha e o seu impacto nas operações. É certo que a fragmentação tem um efeito crítico nas operações de carga, mas pouca informação quantitativa está disponível, sobre a qual se podem delinear estratégias racionais de lavra. Spathis (2002), discutiu alguns aspectos da redução de tamanho e a sua influência na dissociação de minerais, que descreveu principalmente a área de previsão e avaliação juntamente com os pressupostos relacionados: finos, tamanho médio, oversize, distribuições cumulativas de tamanho e protocolo de medição.

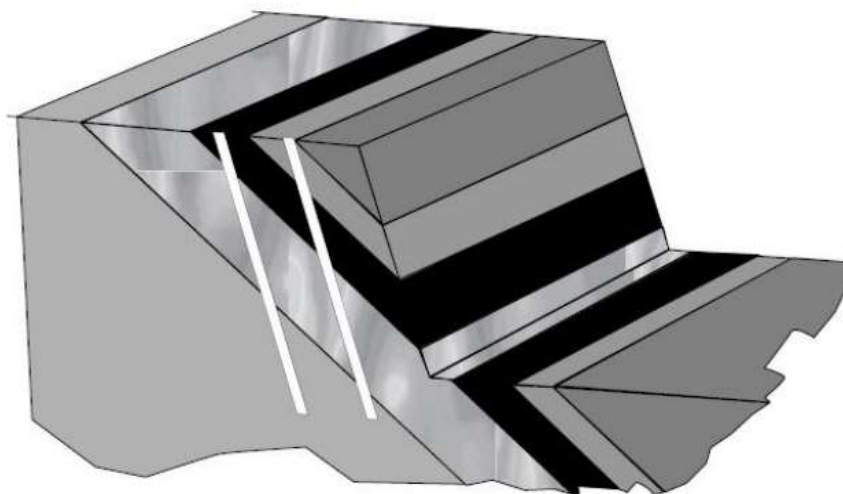
Hustrulid (1999) *apud* por Burkle (1979) diz que os resultados da detonação são relacionados pela orientação das estruturas do maciço rochoso.

Três casos que têm de ser considerados são:

- (i) iniciação a favor do mergulho,
- (ii) iniciação contra o mergulho, e
- (iii) iniciação ao longo da direção de foliação.

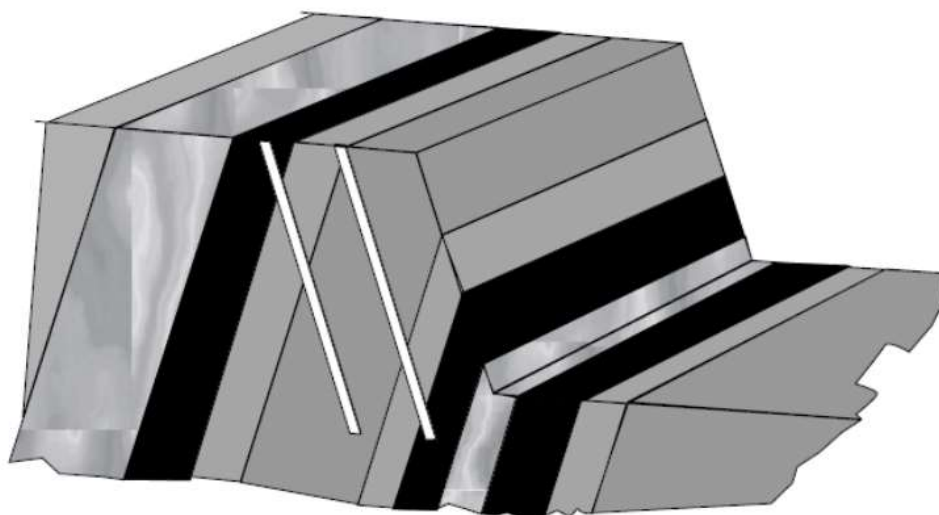
Enquanto se inicia com o mergulho, a ruptura aumenta, o problema do pé da crista diminui, resultando num piso liso, e o lançamento aumenta, resultando em pilha de minério espalhada e baixa (FIG. 2). Quando se detona contra o mergulho, há menos ruptura, mas resulta num piso irregular, e a diminuição do lançamento, e proporciona num perfil de pilha de minério mais alto (FIG. 3). Finalmente, ao disparar ao longo da bancada (FIG. 4), o chão pode ser muito irregular, devido aos diferentes tipos de rochas que se interceptam a bancada. Pelas mesmas razões, o backbreak é irregular. O efeito da junção na fragmentação de rochas foi documentado por Hustrulid (1999) e é apresentado na figura a seguir.

Figura 2 - Detonação a favor do mergulho da foliação.



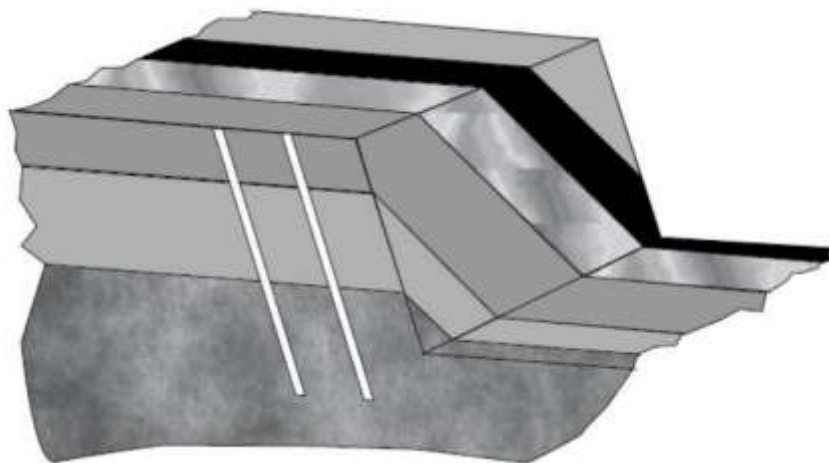
Fonte: Gokhale, 2011

Figura 3 - Detonação contra o mergulho da foliação



Fonte: Gokhale, 2011

Figura 4 - Detonação ao longo da direção de foliação



Fonte: Gokhale, 2011

Alguns estudos indicam que a detonação a favor da foliação é a mais indicada, devido ao fato que os planos mais inconsistentes são paralelos a face da bancada e facilita a ruptura por flexão, formando assim a granulometria mais desejada. Já a detonação ao longo da superfície ao longo da direção de foliação, é a menos utilizada e considerada desfavorável, pois o pé da bancada pode ser formado em diferentes direções, dessa forma, existe uma variabilidade grande dentro do processo e como resultado várias irregularidades (REN; FANG, 2009).

2.2.2 Características do desmonte de rocha

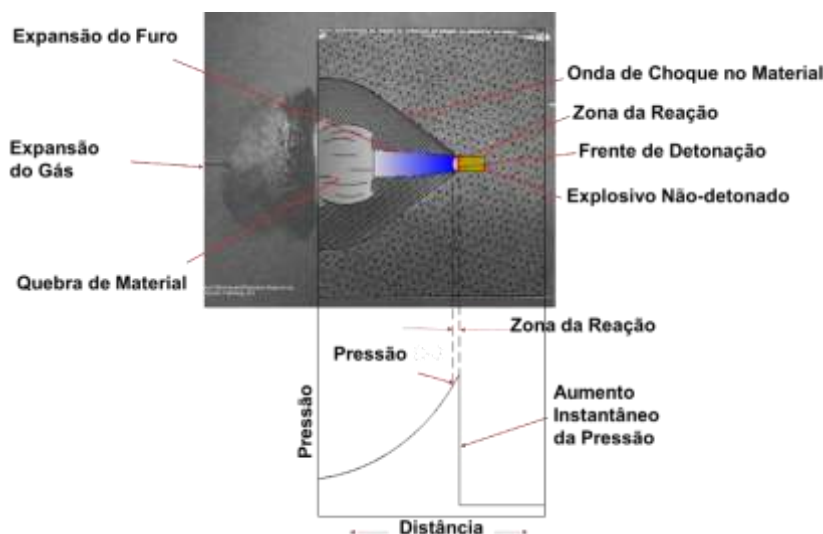
Liberação de energia de explosivos e quebra da Rocha:

- Mecanismo de quebra de rocha, durante a liberação de energia explosiva da detonação e outros pontos relevantes são discutidos abaixo:
- Quando uma carga explosiva é detonada, ocorre uma reação química que, muito rapidamente, transforma a massa explosiva sólida ou líquida em grande quantidade de calor e gases, gerando pressões elevadíssimas e de grande poder destruidor.
- Esta reação começa no ponto de iniciação, onde o detonador está ligado aos explosivos e forma onda de choque convexa (onda compressiva) no seu entorno de ataque, que atua na parede do furo e se propaga através da coluna explosiva.

- À frente da zona de reação, encontram-se produtos explosivos não detonados, e por detrás da zona de reação encontram-se gases quentes em expansão.

A onda de choque (FIG.5) autossustentada produzida por uma reação química foi descrita por Chapman e Jouquet como um espaço. Este espaço de espessura negligenciável é limitado por dois planos infinitos - de um lado da onda está o explosivo não reagido e do outro, os gases explodidos, como se pode ver na figura 5. Há três zonas distintas: a) O meio não perturbado à frente da onda de choque, b) Uma pressão rápida em Y que leva a uma zona em que a reação química é gerada pelo choque, e completa em X, c) Uma onda de estado estável onde a pressão e a temperatura são mantidas. Esta condição de estabilidade existe em X hipotético, que é comumente referido ao plano Chapman- Jouquet (C-J). Entre os dois planos X e Y, há conservação de massa, momento e energia.

Figura 5 - Demonstração da onda de choque de um explosivo



Fonte: Enaex

A velocidade de detonação (VOD) de um explosivo é função do calor de reação de um explosivo, da densidade e do confinamento. A pressão de detonação (unidade em N/m^2) que existe no plano C-J é função do VOD dos explosivos. A detonação de explosivos em colunas cilíndricas e em condições não definidas leva a uma expansão lateral entre os planos de choque e C-J resultando numa zona de reação mais curta e

com menos perda de energia. Assim, é comum encontrar um VOD muito mais baixo em situações não confinadas do que em situações confinadas (FIG. 6).

Figura 6 - Reação do explosivo

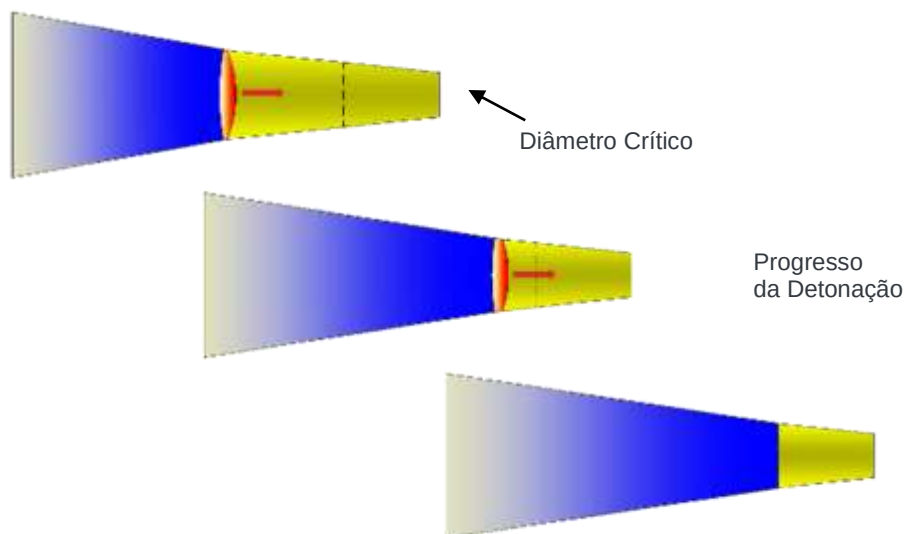


Fonte: Enaex

As moléculas do explosivo são quebradas na zona de reação, os átomos começam a recombinar e expandir, posteriormente a energia de choque é a divisão atribuída à velocidade de detonação e espessura da zona de reação. Já a energia de elevação é a divisão atribuída à expansão da reação dos produtos. Sendo que a frente da detonação é supersônica e a zona de reação é subsônica, porque a pressão e densidade são muito altas. O plano CJ é onde a pressão e densidade caem o suficiente para viajarem à velocidade supersônica novamente.

Esse diagrama (FIG. 7) demonstra a detonação em um explosivo com diâmetro progressivamente reduzido. Há um ponto em que as perdas de borda são muito grandes e a detonação cessará, esse é o diâmetro crítico. A medida que a detonação acontece, da esquerda para direita, ela continuará até que o diâmetro crítico seja alcançado e assim, a detonação cessará. Outros efeitos importantes no diâmetro crítico são causados por confinamento, densidade, tamanho de partícula, temperatura inicial e aditivos.

Figura 7 - Diagrama de detonação de um explosivo com diâmetro reduzido



Fonte: Enaex

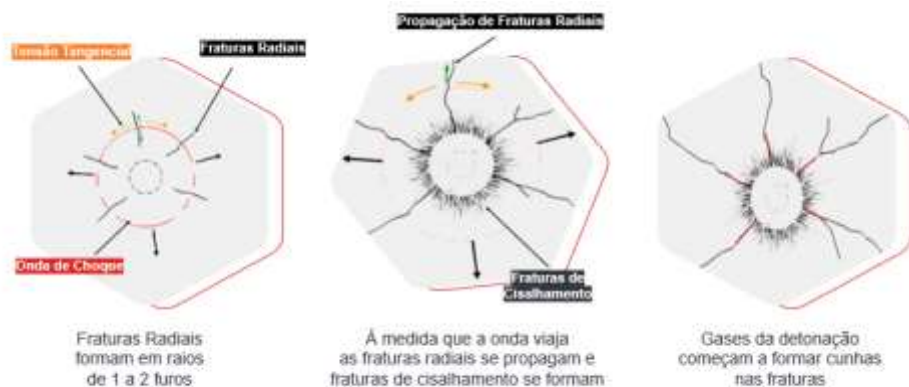
2.3 Quebra de rocha por Detonação e Interação da energia explosiva com rocha

Existem três fontes de geração de fragmentos em minas: (a) Fragmentos formados por novas fraturas, criadas por carga explosiva detonante, (b) Blocos in-situ que foram simplesmente libertados do maciço rochoso sem mais fraturas, e (c) Fragmentos formados pela extensão das fraturas in-situ em combinação com novas fraturas.

A fragmentação da rocha por explosivo, é conseguida através de carga dinâmica introduzida no maciço rochoso. A carga explosiva de rocha pode ser separada em duas fases, a onda de choque e a fase de pressão de gás (FIG. 8).

- Um VOD alto, significa que mais rápida foi a liberação de energia da massa explosiva, sob a forma de uma onda de choque seguida de pressão de gás. Por outras palavras, mais rápida é a velocidade de detonação do explosivo, mais rápida é a energia aplicada à parede do furo, e por um período de tempo mais curto (FIG. 9).

Figura 8 - Fragmentação por onda de choque

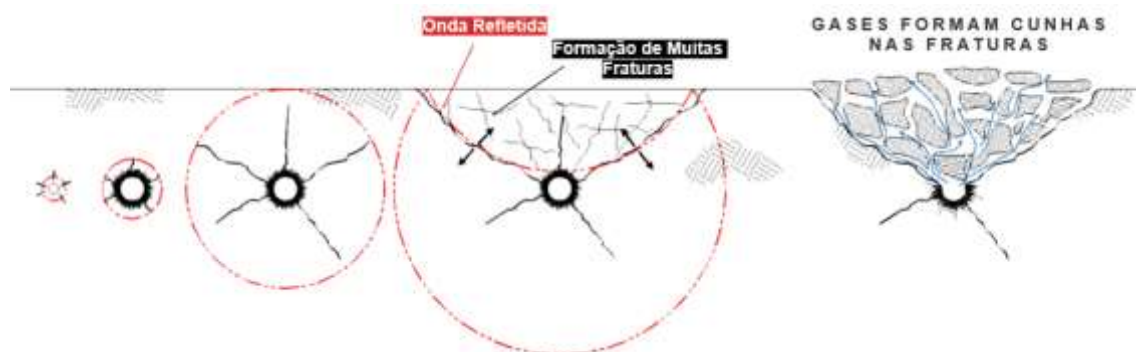


Fonte: Enaex

- Inversamente, com uma velocidade de detonação mais lenta, a energia é aplicada mais lentamente, e por um período de tempo mais longo. O grau de acoplamento entre o explosivo e a parede do furo terá um efeito na eficiência com que a onda de choque é transmitida para a rocha.
- Os explosivos bombeados resultarão numa melhor transmissão de energia, do que os produtos encartuchados, pois existe um espaço entre o produto e a parede do furo.
- Mais uma vez, a pressão que se acumula no furo depende não só da composição explosiva, mas também das características físicas da rocha.
- Uma rocha forte e competente resultará em pressões mais elevadas do que uma rocha fraca e compressiva.
- Quando a onda de choque atinge a parede do furo, começa o processo de fragmentação.
- Esta onda de choque, que começa à velocidade do explosivo, diminui muito rapidamente assim que entra na rocha e, numa curta distância, é reduzida à velocidade sónica daquela rocha em particular.
- A maioria das rochas tem uma resistência à compressão que é aproximadamente 7 vezes superior à sua resistência à tração, ou seja, é necessário 7 vezes mais energia para a esmagar do que para a desmontar.

- Quando a onda de choque encontra pela primeira vez a parede do furo, a força compressiva da rocha é excedida pela onda de choque e a zona imediatamente à volta do furo é esmagada.

Figura 9 - Onda refletida em uma face livre



Fonte: Enaex

- À medida que a onda de choque irradia para fora, em velocidade decrescente, a sua intensidade cai abaixo da força compressiva da rocha e o esmagamento compressivo termina.
- Contudo, para além desta zona esmagada, a intensidade ainda está acima da resistência à tração da rocha e faz com que a massa de rocha circundante se expanda e falhe em tensão, resultando em fissuras radiais.
- O gás quente que segue a onda de choque expande-se para as fendas radiais e prolonga-as ainda mais.
- Esta é a zona onde acontece a maior parte do processo de fragmentação.
- No entanto, se a onda de choque compressiva que irradia para fora do buraco encontra um plano de fratura, descontinuidade ou uma face livre, é refletida e torna-se uma onda de tensão com aproximadamente a mesma energia que a onda compressiva.
- Este mecanismo de quebra de rocha de reflexão depende fortemente de três requisitos importantes:
- Se levada ao extremo, quando esta quebra reflexiva ou "spalling" ocorre numa face livre, pode resultar num lançamento violento, uma situação que não é desejável.
- vez que as tensões compressivas e de tração causadas pela queda da onda de choque abaixo da resistência à tração da rocha, a onda de choque torna-se

uma onda sísmica que irradia para fora à velocidade sónica do material através do qual passa.

- Neste momento, já não está a contribuir para o processo de fragmentação.

A onda compressiva (a onda de tração refletida resultante) deve ainda ser de intensidade suficiente para exceder a resistência à tração da rocha, o material em lados opostos do plano de fratura ou descontinuidade deve ter impedâncias diferentes e por último, o pulso compressivo deve chegar paralelo, ou quase paralelo, ao plano de fratura ou à face livre.

O desmonte de rochas é uma ciência, tendo como bases o conhecimento, a experiência, o estudo e a análise de práticas passadas em relação a estratos rochosos e geologia, etc., faz com que o desmonte atinja a perfeição. Assim, para um blaster, uma ferramenta valiosa é o arquivo de relatórios de detonação que ele constrói à medida que ganha experiência. Estes não só fornecem provas da qualidade do seu trabalho, como também fornecem uma riqueza de informação sobre a qual ele se pode basear à medida que se desenvolvem futuras situações de detonação.

2.4 Desenho do plano de fogo

Isto destina-se a ser uma caixa de ferramentas para a utilização de explosivos em pedreiras convencionais e minas a céu aberto. Está escrita não se destina a dar respostas diretas aos parâmetros de desmonte, uma vez que cada mina é única. No entanto, as relações gerais entre os principais parâmetros de plano de fogo; geologia, capacidade de explosão e explosivos, serão aplicáveis, e o modelo de estimativa é uma ferramenta muito boa para o planeamento e experiências, também para ajustes do projeto, quando tal for necessário para melhorar a linha de produção da pedreira à medida que o tempo avança. Vários pontos como critérios de sucesso são mostrados abaixo:

- Planejamento
- Levantamento e marcação de furos
- Ajuste do padrão de perfuração
- Ajuste de taxa específica
- Tempos de retardo e padrão de iniciação

- Perfuração exata
- Material de corte corretamente selecionado
- Controle, documentação e supervisão do trabalho

Ao otimizar as operações da lavra, é muitas vezes difícil conseguir vários elementos de melhoria em simultâneo. É muito importante tentar um esforço de cada vez e ter a certeza das conclusões de cada ajustamento específico antes de introduzir novos ajustamentos. Os elementos de melhoramento devem ser efetuados de acordo com uma estratégia mutuamente superior.

É importante manter continuamente o processo de melhoria e estar sempre interessado em aumentar os conhecimentos e competências dos trabalhadores sobre o processo. Isto deve ser feito para se ganhar competência e realizar as potenciais melhorias a longo prazo. É importante documentar os resultados para evitar a perda de informação se a equipe mudar, por exemplo. A soma das melhorias será mais frequentemente visualizada sob a forma de maior eficiência e menores custos de reparação e manutenção. Compreender o significado do processo de desmonte como um ciclo contínuo, como os vários parâmetros, podem ser alterados para otimizar o resultado desejado, e avaliar o resultado, é essencial ao otimizar os processos de exploração da mina.

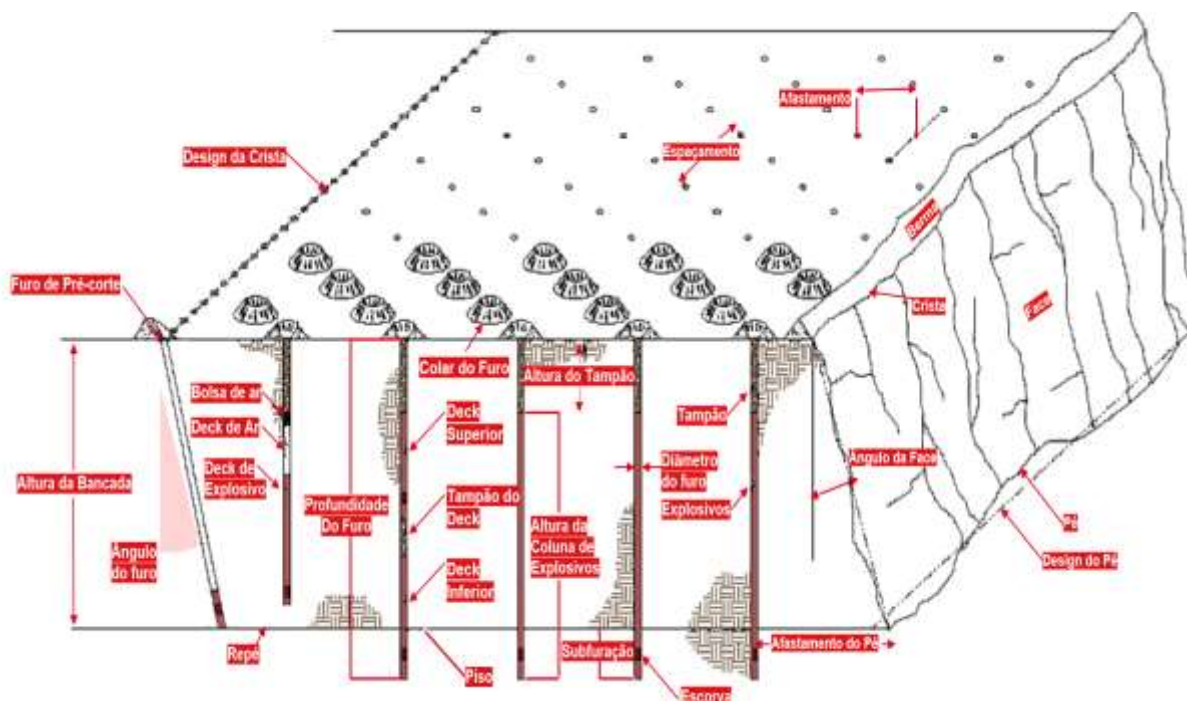
2.5 Cálculos do plano de fogo e fórmulas empíricas

- Na concessão de uma detonação, os seguintes princípios devem ser tidos em conta:
- A força explosiva funciona melhor quando a rocha que está a ser fragmentada tem uma face livre para a qual se pode partir.
- Deve haver um vazio ou espaço aberto adequado para onde a rocha quebrada se possa mover e expandir.
- Para utilizar corretamente a energia disponível, o produto explosivo deve estar bem confinado dentro da rocha.

Se um ou mais destes princípios acima não for utilizado, o resultado geralmente não será o esperado.

Algumas nomenclaturas são usadas para caracterizar itens presente na bancada durante a fase de carregamento e detonação (FIG.10).

Figura 10 - Nomenclatura de itens em uma bancada



Fonte: Enaex

São elas:

- Design de Crista: condição física da crista
- Furo de pré-corte: furos realizados na bancada para melhorar a condição da face.
- Afastamento: distância entre linhas
- Espaçamento: distância entre furos
- Altura da Bancada: altura do pé até a crista
- Ângulo do furo: angulação que o furo é realizado pela perfuratriz
- Berma: material usado para segurança entre bancada e face
- Crista: parte superior da face
- Face: área livre, sem material
- Ângulo da Face: angulação em que a face está em relação ao pé
- Pé: parte inferior da face
- Design do pé: condições físicas do pé

- Afastamento do pé: distância entre o furo e o pé
- Bolsa de ar: área dentro do furo que não contém material
- Deck de ar: espaço sem material entre explosivos
- Deck de explosivo: espaço no furo que contém explosivos
- Repé: material adjacente do furo detonado, se encontra na parte inferior
- Profundidade do furo: distância entre o colar do furo e o fundo
- Colar do furo: parte interna do furo
- Deck superior: explosivos contidos na parte superior do furo
- Tampão do deck: material responsável por confinar o explosivo
- Deck inferior: explosivos contidos na parte inferior do furo
- Piso: área de circulação na bancada
- Altura do tampão: quantidade mensurável de material responsável por confinar o explosivo
- Altura da coluna de explosivos: quantidade mensurável de explosivo
- Subfuração: espaço no fundo do furo sem explosivo
- Escorva: geralmente combinação usada entre explosivo e cordel detonante
- Diâmetro do furo: tamanho da abertura a ser utilizada na perfuração
- Explosivos: composto ou mistura capaz de detonar

A quantidade de energia que pode ser carregada depende do volume ou diâmetro do furo; por conseguinte, o diâmetro do furo e a força da rocha determinam largamente a distância da carga.

Muitas vezes, o diâmetro do furo já foi estabelecido pelo equipamento de perfuração em mãos. Se não o fez, o diâmetro ótimo do furo deve ser selecionado com base em considerações tais como fragmentação desejada, altura da bancada, qualidade da rocha e produtividade.

Ao selecionar o tamanho do furo, diâmetros de furo menores e padrões mais apertados resultarão numa melhor fragmentação, mas aumentarão a perfuração, o carregamento e os custos do produto.

Alturas mais altas da bancada permitirão maiores diâmetros de furo e maiores cargas e menos custos de perfuração e desmonte.

Além disso, se o material a ser desmontado for em bloco, é bastante provável que alguns blocos possam emergir intatos, a menos que diâmetros de furo mais pequenos e padrões mais apertados coloquem explosivos dentro deles.

Uma vez estabelecido o diâmetro do furo, a distância da carga pode ser selecionada.

2.6 Tempo de retardo

Muito raramente em uma detonação convencional, todas as cargas são detonadas no mesmo instante. Normalmente, existe um intervalo de tempo e direção ou direções específicas para atrasar as cargas. Para túneis, derivações e veios onde não existe uma face livre paralela ao eixo dos furos, são utilizados períodos de retardo mais longos. Estes destinam-se a proporcionar tempo suficiente para que a rocha fraturada pelos furos iniciais seja expulsa, de modo a que haja espaço para a rocha ser “empurrada” pelos furos seguintes que se expandem.

Na construção, mineração a céu aberto e subterrânea, são utilizados atrasos de milissegundos entre as cargas de uma explosão. Há várias razões básicas para o fazer, por exemplo: para assegurar que um ou mais faces livres progridam através da detonação, proporcionando uma carga consistente. Para aumentar a fragmentação entre furos adjacentes. Para reduzir a vibração do solo e o movimento de ar. A utilização de tempos mais curtos ou mais longos entre as linhas influencia diretamente na fragmentação do material, de certa forma quanto maior o tempo de retardo maior é a face livre criada entre a primeira e a segunda linha de furos e assim por diante, o que resulta em um maior grau de liberdade ou alívio. (ROSENHAIM *et al.*, 2018).

2.7 Fragmentação

Segundo Jeong, Jeon e Choi a fragmentação primária ocorre durante a fase de detonação. As ondas de choque excedem a capacidade compressiva e de resistência à tração da rocha, e a rocha é esmagada e pulverizada perto da boca do furo, e serão criadas fissuras radiais a partir do orifício até um certo ponto (igual a 4 - 5 vezes o raio do furo). A pressão do gás penetrará novas fendas e fissuras e juntas existentes, afrouxando a massa rochosa e atirando-a para fora e sobre o chão da bancada.

A quebra da fragmentação secundária começa com o lançamento quando o material fragmentado acelera para fora da bancada. A fratura secundária é atribuída a: colisões entre fragmentos no ar e entre fragmentos e o chão da bancada; níveis elevados de tensão compressiva e energia elástica conservada na rocha são libertados quando os fragmentos são soltos da bancada.

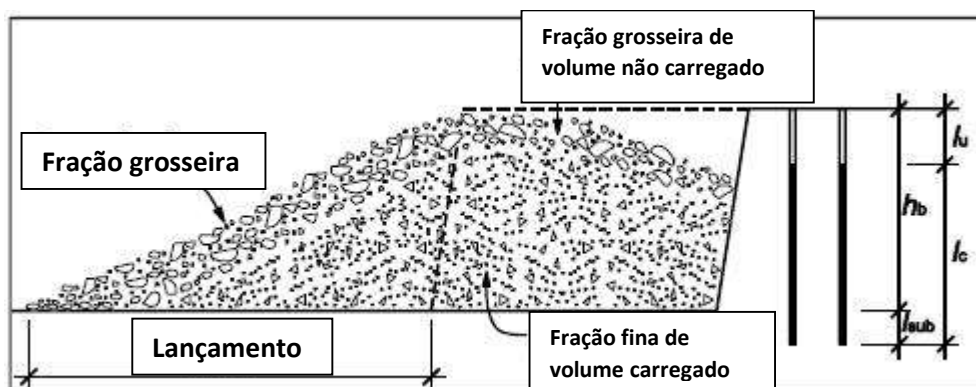
A fragmentação varia através da pilha de rocha (FIG. 11). Os fragmentos mais grosseiros provêm da primeira fila e da zona não carregada na parte superior da explosão.

Fatores controláveis que influenciam a fragmentação primária:

- Diâmetro do furo
- Massa de carga explosiva
- Distribuição da carga na bancada
- Tempo de retardo entre furos

A fragmentação é também influenciada pela fratura original da rocha. Isto aplica-se tanto durante a detonação como nas operações seguintes, tais como carregamento, transporte, trituração e colocação da rocha.

Figura 11 - Demonstração de lançamento de pilha



Fonte: Mining and Blasting Weblog

Estudos da pilha pós desmonte mostram isso.

As frações mais grosseiras da pilha de rocha têm origem na borda da detonação, e no volume não carregado.

As frações mais grosseiras formam uma saia que cobre a parte superior da pilha. O aumento do comprimento não carregado aumenta rapidamente a profundidade desta camada superior.

A fragmentação da seção do ombro é altamente dependente das condições do topo da bancada. As explosões do terreno produzem normalmente mais blocos do que as condições do chão de bancada previamente subdivididas, que têm origem numa explosão sobrejacente. Diminuir o comprimento de decapagem para reduzir a quantidade de blocos sob redimensionados não será necessariamente um sucesso.

A parte contida na pilha de rocha, que tem origem na frente carregada do plano de fogo, oferece a rocha mais fragmentada.

Segundo Cunningham (2005), diversos modelos foram criados ao longo dos anos a fim de tentar prever o resultado da distribuição granulométrica, em especial na área de desmonte de rochas. Tais estudos se divergem em dois pontos: modelos mecânicos e empíricos.

Vários autores propuseram a formulação de uma equação que pode estimar o tamanho de grão produzido pela detonação de rocha com base em dados de poços, as propriedades dos explosivos utilizados, o cronograma de incêndio e as características do campo, incluindo Kuz-ram e Lilly (FILHO, 2016).

Para todos os propósitos práticos, os modelos empíricos são os usados para o projeto diário de detonação e extrapolam para fragmentos mais finos com custos de energia mais altos; a modelagem mecânica governa a física da detonação e a energia de uma configuração específica de detonação em rochas bem definidas. Processo de transferência, resultando em toda uma gama de resultados explosivos (CUNNINGHAM, 2005).

O modelo Kuz-Ram é indiscutivelmente o método mais amplamente utilizado para estimar fragmentos explosão a explosão, e o interesse renovado no controle do campo de explosão trouxe maior atenção a esse modelo. A força fundamental do modelo reside em sua simplicidade na coleta de dados de entrada e sua ligação direta entre o projeto de detonação e os resultados da fragmentação da rocha (CUNNINGHAM, 2005).

2.8 Regulamentação para o uso de drones

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (FIG.12), criou regras para operações civis de aeronaves não tripuladas, também conhecidas como drone. O Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017) da ANAC é complementar às normas de operação de drones estabelecidas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

De acordo com a ANAC, aeromodelo é uma aeronave não tripulada de controle remoto utilizada para recreação e lazer, e aeronave de controle remoto (RPA) é uma aeronave não tripulada utilizada para outros fins, tais como experimental, comercial

ou institucional. Ambos os tipos (aeronave e RPA) só podem ser operados em áreas que mantenham uma distância horizontal mínima de 30 de pessoas que discordem ou não estejam envolvidas na operação, e cada piloto remoto só pode operar um equipamento por vez.

Para operar um aeromodelo, as normas da ANAC são simples, basta respeitar a distância-limite de terceiros e observar as regras do DECEA e da ANATEL. Aeromodelos com peso máximo de decolagem (incluindo-se o peso do equipamento, de sua bateria e de eventual carga) de até 250 gramas não precisam ser cadastrados junto à ANAC. Os aeromodelos operados em linha de visado visual até 400 pés acima do nível do solo devem ser cadastrados e, nesses casos, o piloto remoto do aeromodelo deverá possuir licença e habilitação.

Figura 12 - Logo da Agência Nacional de Aviação Civil



Fonte: Anac

O detentor de um Certificado de Aeronavegabilidade Especial de RPA – CAER, ou aquele com quem for compartilhada sua aeronave, é considerado apto pela ANAC a realizar voos recreativos e não recreativos no Brasil, com aeronave não tripulada cujo projeto está aprovado, em conformidade com os regulamentos aplicáveis da ANAC, em especial o distanciamento de 30 metros laterais de pessoas não anuentes e a necessidade de se realizar avaliação de risco operacional, dentre outras. É responsabilidade do operador tomar as providências necessárias para a operação segura da aeronave, assim como conhecer e cumprir os regulamentos do DECEA, da Anatel, e de outras autoridades competentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em relação à elaboração do presente trabalho, trata-se de um estudo de caso, apresentando dados qualitativos e quantitativos segundo uma abordagem exploratória, que proporciona a definição de um modelo pioneiro para análise de fragmentação de rocha pós desmonte.

A fim de se realizar o voo de drone para criação de orthophoto dos pós desmonte, e posteriormente efetuar a análise granulométrica por meio do software Strayos, foram pré-estabelecidas 4 etapas (FIG. 13).

Na primeira etapa, foi reunida e estudada informações referentes a aeronave não tripulada (UAV ou drones), parâmetros de desmonte de rocha e informações sobre como a fragmentação influencia na qualidade do processo, da mina até a usina. Na segunda etapa, foi realizada a escolha da área a ser estudada, informações como localização da mina, litologia da bancada e características da malha.

Figura 13 - Foto retirada por drone da massa desmontada



Fonte: O autor, 2022

Já na terceira etapa, foi realizado o voo com o drone. O drone utilizado foi da marca DJI e seu modelo é Mavic Mini 3 PRO. Aqui está algumas especificações da aeronave segundo o manual do fabricante (QUADRO 1, 2, 3 e 4).

Quadro 1 - Especificações aeronave

Peso de decolagem	<249 g
Dimensões (C×L×A)	Dobrada: 145×90×62 mm
	Desdobrada: 171×245×62 mm
	Desdobrada (com hélices): 251×362×70 mm
Comprimento diagonal	247 mm
Velocidade máx. de ascensão	3 m/s
Velocidade máx. de descensão	3 m/s (modo N)
Velocidade máx. de voo (ao nível do mar, sem vento)	10 m/s (modo N)
Altura máx. de serviço acima do nível do mar	Com a Bateria de Voo Inteligente: 4000 m
Duração máx. de voo	34 min. (com a Bateria de Voo Inteligente e medido ao voar a 21,6 km/h em condições sem vento)
Duração máx. de voo estacionário	30 min. (com a Bateria de Voo Inteligente em condições sem vento)
Distância máx. de voo	18 km (com a Bateria de Voo Inteligente e medido ao voar a 43,2 km/h em condições sem vento)
Resistência máx. ao vento	10,7 m/s
Sistema global de navegação por satélite (GNSS)	GPS + Galileo + BeiDou
Frequência de funcionamento	2,400-2,4835 GHz;
	5,725-5,850 GHz
Potência do transmissor (EIRP)	2,4 GHz: <26 dBm (FCC), <20 dBm (CE/SRRC/MIC)
	5,8 GHz: <26 dBm (FCC/SRRC), <14 dBm (CE)
Alcance de precisão em voo estacionário	Vertical:
	±0,1 m (com posicionamento visual)

	±0,5 m (com posicionamento por GNSS)
	Horizontal:
	±0,3 m (com posicionamento visual)
	±0,5 m (com posicionamento por GPS)

Fonte: Dji

Quadro 2 - Sistemas de detecção

Dianteira	Alcance de medida de precisão: 0,39 - 25 m
	Velocidade de detecção efetiva: ≤ 10.5 m/s
	FOV (campo de visão): Horizontal: 106°; Vertical: 90°
Traseira	Alcance de medida de precisão: 0,36 - 23,4 m
	Velocidade de detecção efetiva: ≤ 8 m/s
	FOV (campo de visão): Horizontal: 58°; Vertical: 73°
Inferior	Alcance da medida de precisão: 0,15-9 m
	Alcance de voo estacionário: 0,5-12 m
	Alcance de voo estacionário do sensor visual: 0,5-30 m
	Velocidade de detecção efetiva: Velocidade de voo <3 m/s
	FOV (campo de visão): Frontal/traseiro: 104,8°; Esquerdo/direito: 87,6°
Ambiente operacional	Superfícies refletivas difusas com padrão claro de iluminação e refletividade >20% (como paredes, árvores, pessoas, etc).
	Iluminação adequada (lux > 15, o equivalente a um ambiente com níveis normais de exposição como em ambiente fechado sob uma luz fluorescente).

Fonte: Dji

Quadro 3 - Sobre seu estabilizador

Alcance mecânico	Inclinação: -135° a 80°
	Rotação: -135° a 45°
	Giro: -30° a 30°
Alcance controlável	Inclinação: -90° a 60°
	Rotação: -90° a 0°
Estabilização	mecânica triaxial (inclinação, rotação, giro)
Velocidade máx. controlável (inclinação)	100 °/s

Alcance da vibração angular	$\pm 0,01^\circ$
-----------------------------	------------------

Fonte: Dji

Quadro 4 - Sobre câmera da aeronave

Sensor	CMOS 1/1.3"
	Píxeis efetivos: 48 MP
Lente	Campo de visão: 82,1°
	Abertura: f/1.7
	Formato equivalente a 35 mm: 24 mm
	Alcance de foco: 1 m a ∞
Alcance ISO	Foto: 100 a 6.400 (Auto), 100 a 6.400 (Manual)
Velocidade do obturador	Obturador eletrônico: 2-1/8.000 s
Dimensões máx. da imagem	4:3: 8064×6048 (48 MP), 4032×3024 (12 MP)
	16:9: 4032 × 2268; 12 MP:
Modo de fotografia	Disparo único
	Intervalo:
	JPEG: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 seg.
	JPEG + RAW: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 seg.
	Variação da exposição automática (AEB): 3/5 quadros em bracketing a 2/3 EV Bias
	Panorâmica: Esfera, 180°, Grande angular e Vertical
Formato de foto	JPEG/DNG (RAW)
Alcance de zoom	4K: 2x
	2.7K: 3x
	FHD: 4x
Perfil de cores	D-Cinelike/Normal

Fonte: Dji

Foi passada as coordenadas do plano de fogo em estudo. Essas coordenadas foram levadas para o Google Earth, para que fosse criado um polígono e assim o plano de voo foi feito pelo software Maply, usando as coordenadas desse polígono.

Posteriormente passado para o aplicativo do drone. Foi feita a captura de imagens para a criação de uma foto englobando toda a massa desmontada (FIG. 14, 15, 16, 17 e 18).

Figura 14 - Polígono feito no Google Earth



Fonte: Google Earth, 2022

Figura 15 - Plano de voo planejado feito pelo software Maply



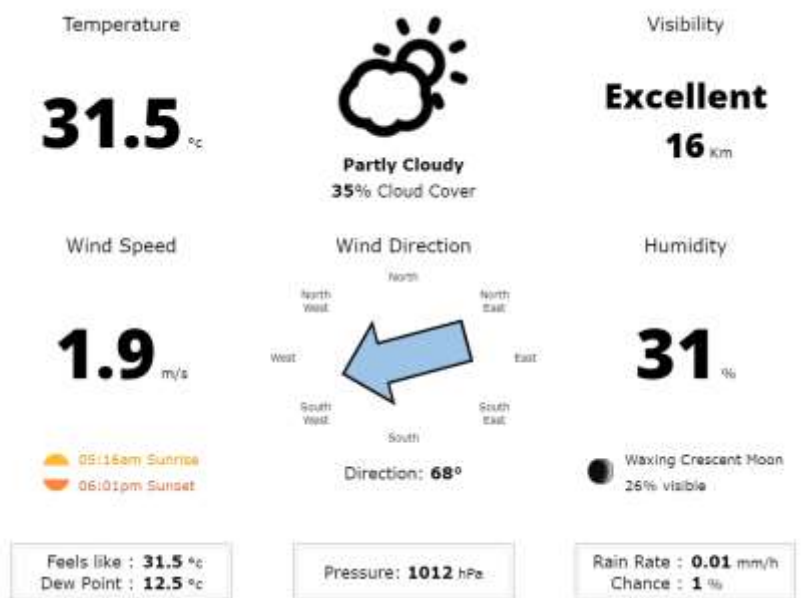
Fonte: Maply, 2022

Figura 16 - Plano de voo executado pelo drone



Fonte: AirData, 2022

Figura 17 - Condições climáticas durante o voo



Fonte: AirData, 2022

Figura 18 - Relação de imagens capturadas durante o voo



Fonte: AirData, 2022

Na quarta e última etapa, foi feita a análise granulométrica através das fotos obtidas em campo. Para isso, foi utilizado o software Strayos, que usa de IA (inteligência artificial) para separar as porções de grãos finos e grossos. Após isso, o programa é capaz de exibir informações da qualidade do desmonte, quantidade em porcentagem de cada espessura e tabela com quantidade atrelada a tamanho dos grãos.

Na etapa de avaliação dos resultados, foram utilizadas as tabelas e gráficos gerados pelo software e comparado com o modelo preditivo. Já os benefícios operacionais serão medidos ao longo do tempo em que a técnica foi amplamente usada em todos os desmontes da operação.

3.1 Ferramenta de análise de fragmentação por AI

Os drones podem entrar imediatamente e fotografar a pilha desmontada. Não há necessidade de abrandar as operações ou de colocar as pessoas em perigo, como passar entre as máquinas ou até mesmo pisar em detritos soltos. Automatizar as medições da pilha, incluindo os limites, queda da calha, centro do movimento de massa, altura, lançamento médio, etc. Não há necessidade de softwares especializados. Sendo necessário colocar os dados pré desmonte para gerar conhecimentos e relatórios.

A IA aumenta drasticamente a velocidade das previsões de pós desmonte. É possível realizar uma detonação e ver imediatamente a forma prevista. Se não for o que pretende, pode entrar e ajustar os parâmetros e ver imediatamente o novo modelo. Quanto mais calibrar a IA com o desenho pré desmonte e as medidas reais da pilha resultante – melhor a IA consegue prever a próxima.

Com a AI, a informação sobre padrões de perfuração pode ser correlacionada com o desempenho do moinho, geologia e com a capacidade de lavra. Este somatório de dados permite ver, como as variáveis numa parte das operações do sítio podem ter efeitos em outros locais e permite tomar decisões comerciais para otimizar o desempenho global da mina.

Na utilização dessa inteligência, a recolha e visualização de dados é automatizada, poupando muitas horas de tedioso trabalho manual. Uma vez que a IA tenha identificado padrões nos dados, pode fazer previsões que lhe permitem ajustar os seus planos instantaneamente para obter os resultados desejados.

Agora, os UAV e a IA tornaram possível a análise pós desmonte para todos. O levantamento pode ser feito sem parar as operações - o drone voa apenas por cima das máquinas e da pilha assim que a poeira abaixar. Alguns minutos mais tarde, tem os seus dados de levantamento. Pode ser feito com a frequência que for necessária. A análise pode ser feita automaticamente com IA já não é necessária qualquer perícia. As futuras detonações podem ser otimizadas utilizando os dados capturados. A IA pode analisar uma enorme variedade de variáveis e identificar padrões em explosões passadas para fazer previsões de melhores explosões futuras.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Local de Estudo

O atual estudo foi realizado em uma mina de minério de ferro. A mina em questão, se localiza na região centro-norte de Minas Gerais. A Figura 19 representa localização da mina.

Figura 19 - Cartografia da região de Conceição do Mato Dentro

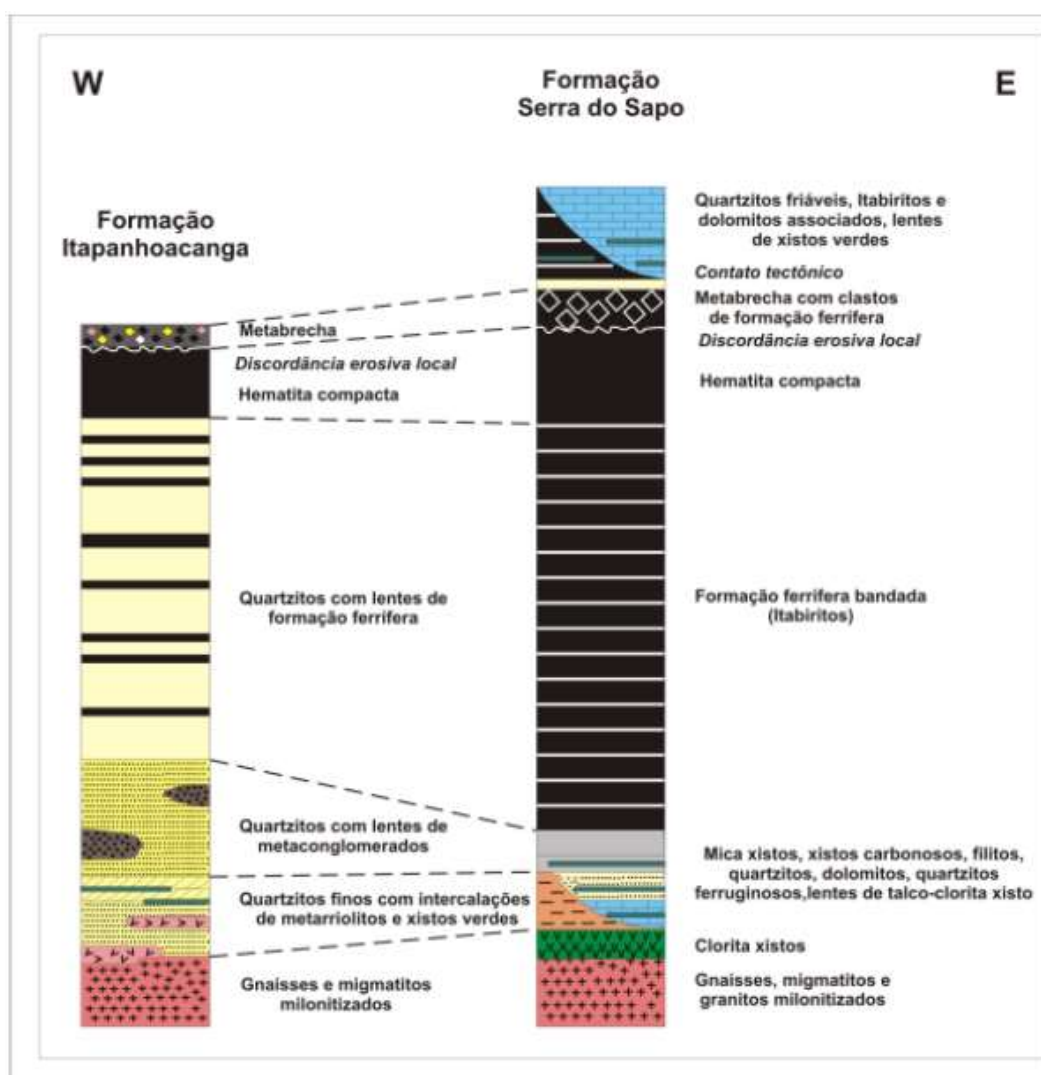


Fonte: Cáritas Brasileira

O empreendimento mineiro se iniciou suas atividades no ano de 2014 e sua capacidade nominal é de 26,5 milhões de toneladas de *pellet feed* de alto teor de ferro (67%) por ano, mas há estudos sobre a possibilidade de ampliar a capacidade nominal do empreendimento. O minério é levado para o Porto de Açu em São João da Barra (RJ) por mineroduto de 529km de extensão, passando por 33 municípios. As Figuras 20 e 21 representam a vista área da região da mina.

As feições geológicas locais são um conjunto de sedimentos metamórficos depositados em bacias intracontinentais e evoluídos para margens passivas. Os sedimentos consistem em: Detritos grosseiros (dos quais conglomerado e arenito), clástico fino (argila) e depósitos químicos, incluindo depósitos de ferro bandado e rochas carbonáticas (FIG. 22).

Figura 22 - Colunas estratigráficas da região entre São Sebastião do Bom Sucesso e Itapanhocanga



Fonte: Zacchi et al., 2010

Rolim (2010) apontou que o teor de ferro no minério de ferro compacto existente está próximo de muitos valores comuns em formações ferríferas sedimentares, indicando que Processos de enriquecimento de subsuperfície na região. Esta pequena quantidade de fluido está envolvida em feontes hidrotermais na gênese dos depósitos

mineralizados são substituídas por fontes de baixo nível Caracterização mineralógica simples de poluentes (alumina e fósforo) e itabiritos, Composto por: quartzo, espelho, placa, hematita esférica e magnetita. A gênese do corpo hematítico está relacionada à existência de falhas de empurrão, como Eles são encontrados em folhas, muitas vezes perto de zonas de falha com veias quartzo relacionado. Teor de ferro em itabiritos quebradiços sugere papel de mecanismo hiperbiótico enriquecimento, o que foi confirmado pela relação inversa observada profundidade e conteúdo. (ROWLING, 2010).

4.3 Características do maciço rochoso

Os dados que são utilizados durante a organização da detonação e criação do plano de fogo, referindo-se aos parâmetros geotécnicos e geomecânicos na Mina do Sapo (TAB. 1).

Tabela 1 - Dados geomecânicos das principais litologias detonadas da Mina do Sapo

Litologia	Densidade (g/cm ³)	Espacamento das Descontinuidades (cm)	Resistência a Compressão Uniaxial (MPa)	Módulo de Young (Mpa)
IF	2.61	0 - 10	0.25 - 5	1.63 - 1.7
ISC	3.02	10 - 30	5 - 50	2.55 - 9.14
IC	3.27	> 200	270 - 301.8	69900

Fonte: Oliveira, 2017

4.4 Plano de fogo mina do sapo

4.4.1 Geometrias do plano

A malha a ser perfurada na bancada, influencia de forma direta na qualidade do desmonte, podendo assim impactar na fragmentação da rocha. Nesse caso, a malha escolhida é correlacionada com a litologia presente no plano.

A razão para a avaliação é que diferentes malhas de perfuração são usadas de acordo com as diferentes resistências de diferentes litologias. A equipe de perfuração e detonação usou a direção do mergulho da rocha junto com o layout de face livre dos polígonos para informar à equipe de pesquisa qual direção a malha do furo de sondagem deveria seguir. As observações de campo mostraram que as faces livres permitem o deslocamento perpendicular à direção do ângulo de mergulho da folhagem, produz uma distribuição de tamanho de partícula mais fina. Com base

nessa observação, a malha começa a ser refinada, e a direção do espaçamento é perpendicular à direção de mergulho da lâmina foliar. Determinando a grade de perfuração e o esquema de queima com base no diâmetro do poço usado e na litologia a ser removida. A malha perfurada e os padrões planos de fogo são mostrados na Tabela 2.

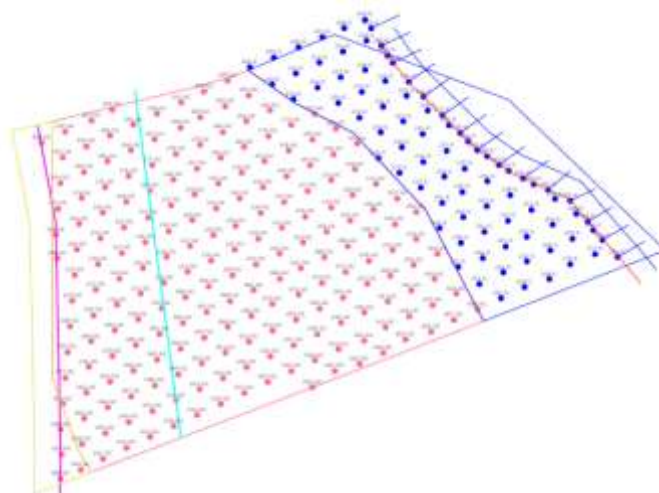
Tabela 2 - Projeto de melhoria de fragmentação em desmonte de rochas

MALHAS DE DESMONTE DE ROCHAS										
Parâmetros de perfuração	Unidade	Tipo de Material								
		IC	ISC	IF	IC	ISC	IF	IC	ISC	IF
Tipo de Equipamento	modelo	CAT	CAT	CAT	DML	DML	DML	DM30	DM30	DM30
Diâmetro	pol	9 7/8"	9 7/8"	9 7/8"	7 1/2"	7 1/2"	7 1/2"	6 3/4"	6 3/4"	6 3/4"
Número de máquinas	un	1	1	1	2	2	2	1	1	1
Afastamento 1ª Linha	m	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Afastamento	m	4.30	4.80	7.30	3.80	4.30	5.70	3.40	3.90	5.20
Espaçamento	m	5.00	5.50	8.40	4.30	5.00	6.50	3.90	4.50	6.00
Altura do banco	m	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Profundidade do furo	m	16.00	16.00	16.40	15.80	15.80	16.00	15.80	15.80	16.10
Relação S/B		1.16	1.15	1.15	1.13	1.16	1.14	1.15	1.15	1.15
RC (kg/m ³)	(g/t)	1.81	1.34	0.50	1.47	1.00	0.50	1.50	1.01	0.50
RC (kg/t)	(g/t)	0.55	0.44	0.20	0.45	0.33	0.20	0.46	0.33	0.20
Tampão	m	4.00	4.50	5.00	3.20	3.60	4.20	2.90	3.30	3.80
Explosivo - ANFO	m	6.00	7.50	11.40	5.60	8.20	11.80	5.90	8.50	12.30
Explosivo - Emulsão	m	6.00	4.00	0.00	7.00	4.00	0.00	7.00	4.00	0.00
Explosivo - ANFO	kg	242.98	303.73	461.67	130.82	191.55	275.65	111.64	160.83	232.74
Explosivo - Emulsão	kg	340.77	227.18	0.00	229.33	131.04	0.00	185.76	106.15	0.00
Explosivos Total	kg	583.75	530.91	461.67	360.14	322.60	275.65	297.39	266.98	232.74

Fonte: Oliveira et al., 2017

Portanto, use um dos padrões existentes para uma determinada área com base nas informações relevantes disponíveis e crie um polígono de perfuração conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Exemplo de plano de fogo



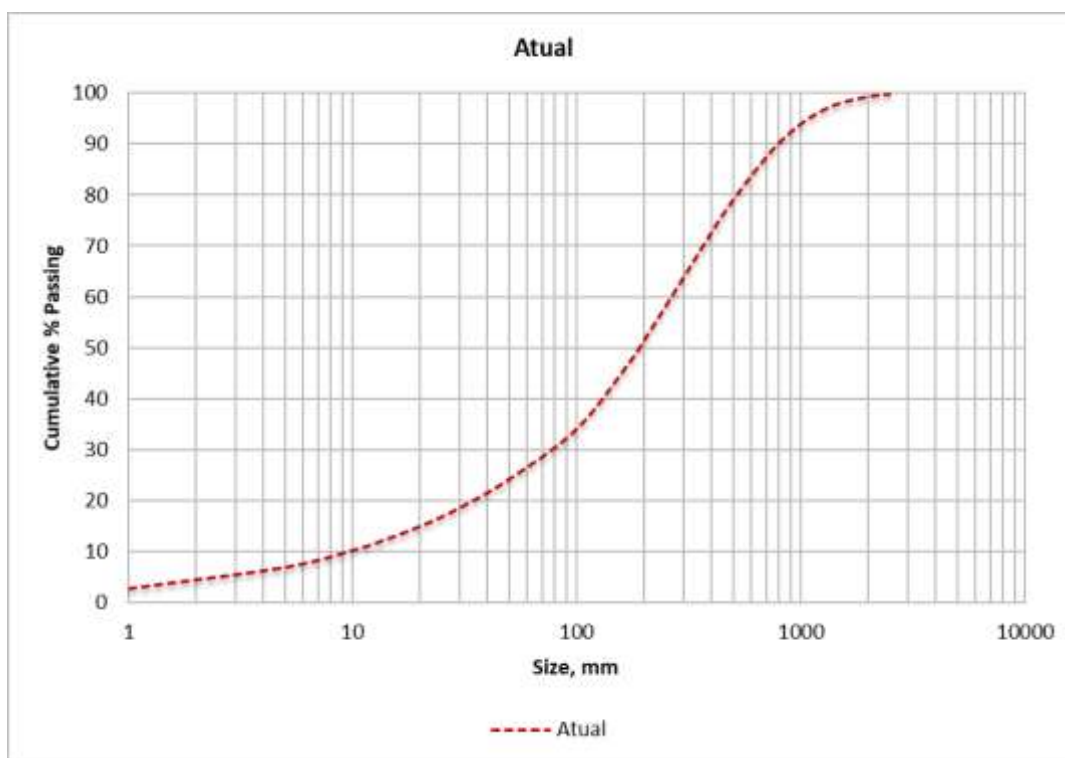
Fonte: Rafael Marra, 2022

4.5 Modelo de previsão granulométrica

Foram realizadas simulações dos possíveis cenários do plano de fogo, utilizado como objeto de estudo na Mina do Sapo. Os parâmetros de plano de fogo foram criados em função da litologia (itabirito compacto, itabirito semicompacto e itabirito friável), do diâmetro de perfuração e razão de carga utilizados na detonação.

O tamanho médio dos fragmentos é considerado o parâmetro mais difícil de medir. A falta de uma boa referência para este parâmetro levou a uma análise sensível usando um limite inferior de 1 metro e um limite superior de pelo menos o espaçamento da malha da configuração do plano de fogo correspondente. O espaçamento é utilizado como limite superior, pois para fins de simulação os resultados não se alteram quando o tamanho médio dos blocos pré-formados utilizados ultrapassa o tamanho máximo da malha (espaçamento). O Gráfico 1 demonstra a análise de sensibilidade realizada.

Gráfico 1 - Análise granulométrica



Fonte: Augusto Ferraz, 2022

Os parâmetros utilizados na análise preditiva foram (TAB. 3, 4, 5 e 6):

Tabela 3 - Parâmetros do plano de fogo

Blast Design	
Blast Type	Atual
Bench Height (m)	16
Burden (m)	4,3
Spacing (m)	5
S/B Ratio	1,16
Hole Diameter (mm)	251
Blast Hole Inclination, β (degrees)	0
Length of Inclined Hole, m	15
Subdrill (m)	1
Stemming Height (m)	5
Staggered Pattern (Y/N)	y

Fonte: Augusto Ferraz, 2022

Tabela 4 - Parâmetros do explosivo

Explosive Parameters	
Explosive (Column Charge)	Ibenite/Anfo
Explosive Length (m)	10
Explosive Density (kg/m ³)	1000
D _{cj} , km/s	6,168
a	0,08
b	0,95
E _o	3,387
(Velocity of Detonation) VOD (m/s)	4900
(Relative Weight Strength) RWS	95
Explosive Weight per Hole (kg)	495

Fonte: Augusto Ferraz, 2022

Tabela 5 - Parâmetros da carga

Powder Factor	
Total Explosive Weight (kg)	495
Total Charge Length (m)	10
Powder Factor (kg/m ³)	1,438
Powder Factor (kg/t)	0,440

Fonte: Augusto Ferraz, 2022

Tabela 6 - Parâmetros da rocha

Rock Parameters	
Rock Density (kg/m ³)	3270
(pressure wave velocity) v_p (m/s)	7362
(shear wave velocity) v_s (m/s)	3749
Youngs Modulus E (GPa)	70
(effect on fines) UCS (MPa)	310
T (Gpa)	25,8
(effect on top size) RQD, %	60
JV	16,7
(Fracture Frequency) FF	10,2
Insitu Block Size old (m)	0,2
Mean Insitu Block Size (m)	0,6

Fonte: Augusto Ferraz, 2022

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise entre o método preditivo e UAV

Para facilitar a adequação e sistematização da análise de fragmentos provenientes do desmonte de rocha, foi criado leitores de escala para que captam de forma uniforme, através de software de análise de imagem digital. Tal processo recebe o nome de foto-granulométrica.

Os softwares de processamento de imagem digital foram desenvolvidos e comercializados nos anos 90 do século XX e são uma ferramenta aceita pela indústria mineira e construção civil, quer na produção, quer no processamento de minerais (Catasus, 2004). Com o desenvolvimento tecnológico muitos são os softwares que operam no mercado como por exemplo o Fragscan® (Schleifer & Tessier, 2000); Spilt Desktop® (Split Engineering, 2001); PowerSieve®; e Wipfrag® (Maerz & Pelangio, 1999).

Especificamente o software de análise de imagem WipFrag utiliza a técnica de análise de imagem digital da rocha desmontada com sistema de granulometria para prever a distribuição do tamanho do grão na pilha. Uma câmera de vídeo efetua o pós-processamento 2D dos dados de imagem, ou seja, a aquisição das imagens da pilha no campo. Um dispositivo com escala é utilizado em cada vista para referenciar o tamanho. As fotografias da pilha são tiradas de ângulos diferentes e depois a imagem é transferida para o computador ou tablet em que o WipFrag está instalado. (NANDA; PAL, 2020). A imagem da rocha quebrada é transformada num mapa de partículas ou rede. As áreas da rede são convertidas em volumes e pesos e os dados resultantes são mostrados como um gráfico. A fidelidade e velocidade da detecção de fragmentos de rocha permitem uma monitorização remota totalmente automática a uma taxa de uma imagem por 3 a 5 segundos. WipFrag pode também comparar a imagem gerada pela rede da pilha global com a imagem original da rocha. Os limites dos fragmentos são analisados eficientemente utilizando Variáveis de Detecção de Borda (EDV). Para maior precisão, os limites das rochas também podem ser melhorados manualmente.

Os sistemas de processamento de imagem digital estão a tornar-se cada vez mais utilizados em aplicações industriais, e não apenas na investigação. Com o advento do poder computacional rápido e barato, melhores técnicas e algoritmos de processamento de imagem, e a disponibilidade de câmeras de vídeo portáteis e

sensíveis à luz, o dimensionamento de materiais está agora a tornar-se rotina. Os métodos de análise baseados na imagem têm muitas vantagens sobre a peneiração tradicional (screening).

- O processamento de imagens é rápido; múltiplas imagens podem ser tiradas rapidamente, e também analisadas rapidamente.
- O processamento de imagens, devido à sua velocidade, não interfere com ou perturba a produção.
- Como o processamento de imagens é barato e rápido, muitas amostras podem ser analisadas, tornando os erros de amostragem menos significativos.
- A grande quantidade e variabilidade da explosão de rocha fragmentada tornam o rastreio totalmente impraticável, exceto para trabalhos ocasionais de investigação. O processamento de imagem, por outro lado, não é limitado pelo tamanho dos volumes de rocha.

Nos últimos anos, a utilização de imagens aéreas feita por drones tem se tornado algo comum no setor minerário. Seja na observação de topografia até o mapeamento geográfico da região. Atrelado a isso, a utilização do mapeamento de volume de pilha pós desmonte e análise global da fragmentação também está sendo estudada e utilizada por pequenas e grandes empresas.

Esse método, foi criado para que fosse suprida algumas limitações do método feito por imagens estáticas da pilha. Para ultrapassar algumas destas limitações, foram propostas técnicas de medição 3D que utilizam Estações LIDAR ou câmeras para capturar imagens. Com utilização de medições 3D na rocha a análise de fragmentação elimina a necessidade de objetos à escala e reduz o erro produzido pela forma da pilha de minério. Se forem feitas medições com uma estação LIDAR, então o erro produzido por condições de iluminação desiguais, também podem ser eliminadas.

Foi baseado nessas premissas que o presente estudo se desenvolveu, onde foi possível realizar a análise por meio de UAV, e sendo capaz de mostrar os resultados presentes através da análise por AI. Na Figura 24 pode se observar a orthophoto realizada, após a coleta de imagens por drone, da massa desmontada.

Figura 24 - Orthophoto massa desmontada



Fonte: O autor, 2022

Com o software Strayos, foi possível realizar a medição do total de massa desmontada, juntamente com o diâmetro mínimo, máximo e médio dos fragmentos de rocha (TAB. 7). Também foi mensurado a quantidade de fragmentos de rocha, o fator de finos e o cut-off.

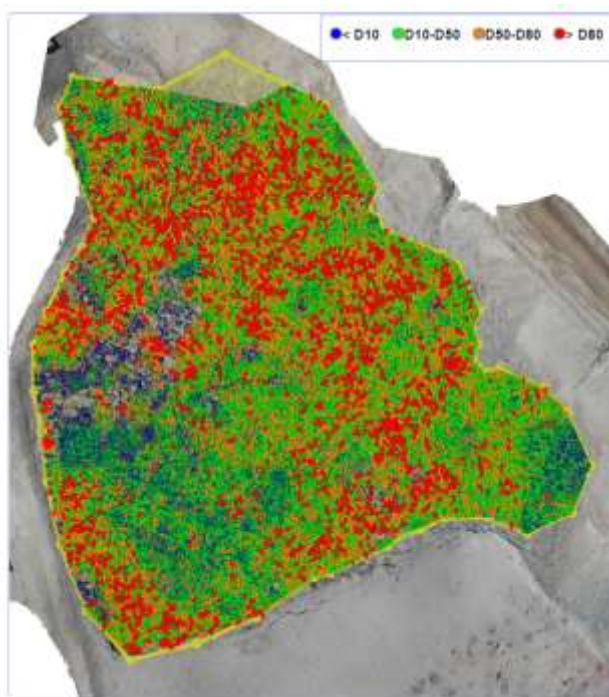
Tabela 7 - Informações da pilha desmontada por AI

GENERAL STATISTICS	
Total muckpile area	12022.14m ²
Min diameter	10mm
Max diameter	3232.5mm
Mean diameter	92.5mm
Diameter stddev	142.3mm
Rocks count	364287
Fines Factor	0.5
Fines Cut-Off(FCO)	214.77mm

Fonte: O autor, 2022

O processo de análise é observado com a utilização de inteligência artificial, onde é segmentada a área a ser medida e realizada a medição com diferença de cores (FIG. 25). Onde a cor azul significa que são rochas com diâmetros menores que 98,4mm, verde entre 98,4mm e 464,7mm, laranja entre 464,7mm e 894mm e por último a cor vermelha significa fragmentos maiores que 894mm (TAB. 8).

Figura 25 - Área selecionada e segmentada por cores em relação ao seu tamanho



Fonte: O autor, 2022

Tabela 8 - Relação entre a porcentagem e tamanho dos fragmentos

Particle Size Distr (mm)	
D10	98.4mm
D50	464.7mm
D80	894mm
n	1.29
b	3.46

Fonte: O autor, 2022

No software também foi possível realizar a comparação entre dois métodos, Swebrec e o Kuzram, onde é observado uma pequena diferença quando comparado ao modelo padrão de visualização utilizado pela aplicação (TAB.9).

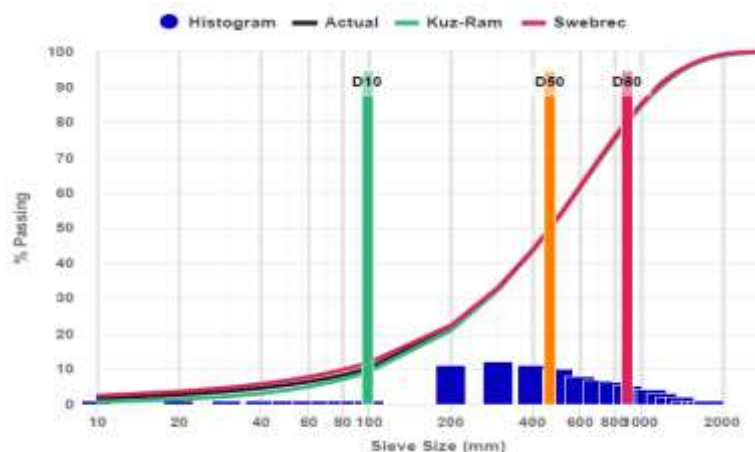
Tabela 9 - Tamanho das partículas com porcentagem

Sieve Size Passing (%)			
Size (mm)	Actual	Swabrec	Kuzram
10	1.43	2.24	0.49
40	4.41	5.58	2.91
70	7.21	8.65	5.89
100	10.17	11.73	9.15
400	43.72	43.59	43.53
700	68.96	69.44	69.1
1000	84.74	85.06	84.41
1300	93.31	93.18	92.61
1600	96.76	97.1	96.67
1900	98.52	98.88	98.57
2200	99.37	99.63	99.41
2500	99.69	99.91	99.76
2800	99.87	99.99	99.91
3100	99.96	100	99.97

Fonte: O autor, 2022

O Gráfico 2 nos mostra que, existe uma grande similaridade entre os dois métodos e o modelo atual. Isso é considerado que o modelo utilizado está devidamente calibrado. No gráfico também é informado o histograma, ou seja, nos permite observar a frequência em que um determinado tamanho aparece na nossa medição. O diâmetro entre 200mm e 500mm foi o mais presente na análise realizada.

Gráfico 2 - Porcentagem de passante com o tamanho da partícula em milímetros



Fonte: O autor, 2022

5.2 Benefícios práticos na utilização do método de análise de fragmentação com UAV

Esta pesquisa demonstra a utilização de Veículo Aéreo Não Tripulado (UAV), sendo uma tecnologia para realizar análises de fragmentação de rochas em tempo real. Nos últimos anos, a tecnologia de UAV foi introduzida no ambiente mineiro para realizar levantamento do terreno, monitorização e cálculos de volume. Estas tarefas são essenciais para a exploração mineira, mas não aproveitam todos os benefícios que os UAV podem oferecer. A tecnologia dos UAV tem o potencial para fornecer a aquisição de dados de alta resolução que podem ser benéficos na concepção do desmonte, operações e outras campanhas de otimização do processo mina até moinho. Além disso, os UAV podem fornecer aquisição de dados rápida e frequentemente, o que melhora a fiabilidade estatística das medições. O estudo pode mostrar que além dos atributos técnicos, que o modelo de análise por UAV tem, também é possível se observar um ganho no tempo de coleta e análise de dados. Ademais, a segurança na coleta dos dados se mostra como um benefício profundamente relevante, pois com a utilização de drones, não se faz mais necessário a interação do colaborador com o meio fragmentado e com alto risco de acidente.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que utilização de UAV nos auxilia na retirada de dados minerários em tempo real e na monitorização das minas, ao mesmo tempo que diminui a exposição do colaboradores aos perigos do campo. Este maior acesso aos dados pode ser benéfico na transmissão atempada de dados de campo, e permite um acompanhamento detalhado do desempenho sem afetar significativamente o tempo necessário para o realizar o serviço. Por exemplo, é possível sobrevoar uma área com drone enquanto a escavadeira está lavrando, evitando assim a interrupção do trabalho. A este respeito, o estudo de caso utilizou um UAV para mapear eficazmente uma pilha de minério enquanto minimizava a exposição e o tempo na bancada. Também permitiu a detecção remota da pilha, a partir de um ângulo melhor do que as técnicas tradicionais baseadas no solo. A utilização do UAV permitiu mapear uma área significativa para a fotogrametria, aumentando a disponibilidade dos dados para o mapeamento digital da pilha desmontada. A fotogrametria permitiu a análise e inspeção visual de áreas da bancada que anteriormente eram inacessíveis. Esta vantagem é particularmente valiosa em áreas onde foram identificadas potenciais falhas e a exploração da mina avança mais profundamente, eliminando o acesso a estes campos.

Globalmente, o estudo de caso demonstra o potencial de utilização de IA juntamente com a tecnologia de UAV para integração de dados detectados remotamente numa mina em funcionamento. A geração das distribuições do tamanho dos blocos obtidas no estudo de caso pode ajudar a melhorar os processos de detonação. Os dados de granulometria da rocha foram totalmente obtidos através da utilização de sensoriamento remoto que foi executado no campo em menos de uma hora. Da mesma forma, a fotogrametria foi realizada numa única tarde. Embora a componente de campo fosse relativamente rápida, o pós-processamento exigiu mais tempo, porém de forma automatizada.

Este documento apresentou os resultados de uma série de provas de conceito, testes com rochas fragmentação utilizando UAVs. A configuração de um sistema automatizado de UAV, que recolhe a fragmentação de rochas em tempo real, foram descritos em detalhes. O sistema automatizado, método de recolha de informação sobre a distribuição do tamanho das rochas foi comparado com as técnicas convencionais. Demonstrou-se que a tecnologia do UAV levava apenas uma fração

do tempo (~20%) que um método convencional mede a fragmentação de rochas dentro de 6% da precisão, onde o convencional desvia-se da verdadeira distribuição em até 14%. Para além de fornecer seus resultados precisos, foram identificados vários benefícios ao longo de todo o estudo. O principal benefício foi que os UAV podem proporcionar uma aquisição de dados rápida e frequente, o que melhora a confiabilidade estatística de medições e reduz os erros de amostragem, sem interromper os processos de produção.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones>. Acesso em: 22 dez. 2022.
- ALMEIDA-ABREU, P.A.; RINGER, F.E. Serra do Espinhaço Meridional: Um Orógeno de Colisão do Mesoproterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 1, p. 1-14, 2002. Disponível em: <https://papegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/10389/9832>. Acesso em: 22 dez. 2022.
- BAMFORD, T.; ESMAIELI, K.; SCHOELLIG, A. P. A real-time analysis of post-blast rock fragmentation using UAV technology. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 31, n. 6, p. 439-456, 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1607/1607.04243.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2022.
- BAMFORD, T., ESMAIELI, K.; SCHOELLIG, A. P. Evaluation of UAV System Accuracy for Automated Fragmentation Measurement. 2018. Disponível em: <https://www.dynsyslab.org/wp-content/papercite-data/pdf/bamford-fragblast12.pdf>. Acesso: 19 nov. 2022.
- GONÇALVES, T. A. M. A análise de Curvas Granulométricas de material desmontado na detecção indireta de anomalias de operações de perfuração. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geoambiente) - Universidade do Porto, 105 f., 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/108862>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- GUO, Q. *et al.* A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. **Scientific Reports**, v. 12, n. 7143, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-11351-0>. Acesso em: 09 out. 2022.
- JEONG, H. *et al.* Fracturing behavior around a blasthole in a brittle material under blasting loading. **International Journal of Impact Engineering**, v. 140, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X1930973X>. Acesso em: 08 out. 2022.
- MEDINAC, F. *et al.* Pre- and Post-Blast Rock Block Size Analysis Using UAV-based Data and Discrete Fracture Network. **Conference: International Discrete Fracture Network Engineering Conference (DFNE)**, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://onepetro.org/ARMADFNE/proceedings-abstract/DFNE18/2-DFNE18/D023S008R002/122726>. Acesso em: 08 out. 2022.
- MERKERT, R.; BUSHELL, J. Managing the drone revolution: a systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control, **Journal of Air Transport Management**, v. 89, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699720305123>. Acesso em: 14 dez. 2022.

REN, G.; FANG, X. Study on the Law of the Movement and Damage to Slope with the Combination of Underground Mining and Open-Pit Mining. **Engineering**, v. 2, n. 3, p. 201-204, 2010. Disponível em: <https://www.scirp.org/html/1581.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

ROLIM, V, K. **Mapeamento geológico estrutural de detalhe da Serra do Sapo e Entorno de Itapanhoacanga**, 45 p., 2010.

ROSENHAIMA, V. L. *et al.* Otimização da fragmentação e minimização de vibrações por mudanças no grau de liberdade e sequenciamento do desmonte de carvão no RS, 2018. Disponível em: https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_A1_A2_A3/A3_ARTIGO_03.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.

SCHENK, F. *et al.* Automatic muck pile characterization from UAV images. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 4, n. W5, p. 163-170, 2019. Disponível em: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-2-W5/163/2019/>. Acesso em: 07 dez. 2022.

SINGH, P. K. *et al.*, Rock fragmentation control in opencast blasting. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 225-237, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775515001353#:~:text=Rock%20fragmentation%20depends%20upon%20two,parameters%20to%20provide%20target%20fragmentation..> Acesso em: 23 dez. 2022.

SURYAJYOTI, N.; BHATU, P. Analysis of Blast Fragmentation Using WipFrag. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**, v. 5, p.1561-1566. Disponível em: <https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT20JUN1086.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2022.

TAMIR, R. *et al.* Utilization of Aerial Drones to Optimize Blast and Stockpile Fragmentation, v. 34, 2017. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/580d03f32e69cf2049ecea50/t/58d198f829687f0926c3e4cd/1490131306808/Utilization+of+Aerial+Drones+to+Optimize+Blast+Fragmentation.pdf>. Acesso em: 30 out. 2022.